

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
OPE – ORGANIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y DE EMPRESA (ASPECTOS
TÉCNICOS, JURÍDICOS Y ECONÓMICOS EN PRODUCCIÓN)

Minimización de costes por pérdida de producción y tiempo
inerte en el MMSP-WP con activación de los operadores ·
Parte II

Joaquín Bautista-Valhondo · Rocío Alfaro-Pozo
(ETSEIB-UPC)

OPE-PROTHIUS · OPE-WP.2016/01 (20160508)
(Documento científico-técnico: 20160508)



PROTHIUS
Càtedra Organització Industrial

<http://futur.upc.edu/OPE>

<http://www.prothius.com>

Minimización de costes por pérdida de producción y tiempo inerte en el MMSP-WP con activación de los operadores · Parte II

Joaquín Bautista-Valhondo, Rocío Alfaro-Pozo *

Research Group OPE-PROTHIUS. Dpto. de Organización de Empresas. Universitat Politècnica de Catalunya.
Avda. Diagonal, 647, 7th floor, 08028 Barcelona, Spain.

Resumen · Abstract

Siguiendo el objetivo de minimizar los costes por pérdida de producción y por tiempo desaprovechado, generados por las secuencias de una línea de montaje de modelos mixtos, se presentan dos modelos matemáticos equivalentes. Los modelos integran simultáneamente los conceptos de sobrecarga de trabajo y de tiempo inerte, además de contemplar la posible activación de los procesadores para reducir su sobrecarga de trabajo, dentro de la legalidad. También se establecen criterios económicos para compensar el sobresfuerzo de los procesadores cuando éstos trabajan a una actividad mayor que la normal. Finalmente los modelos son evaluados y comparados con otros modelos de la literatura por medio de un plan de producción correspondiente a la línea de motores de Nissan en Barcelona.

Palabras clave: Secuenciación de operaciones; Líneas de productos mixtos; Sobrecarga, Saturación, Factor de actividad; MMSP-W; Compensación económica

1 Introducción

Desde la aparición e instalación de la primera cadena de montaje, la industria manufacturera ha tenido una constante evolución, no sólo respecto a los métodos de producción sino también respecto a los métodos de gestión. Todos estos cambios han compartido el mismo objetivo fundamental, un objetivo que todavía hoy en día sigue rigiendo cualquier mejora en los sistemas productivos y/o de gestión y que no es más que la disminución de costes para obtener una ganancia en la productividad y así poder ofrecer un producto más variado, accesible y con mayor calidad.

Así, manteniendo el objetivo de maximizar la productividad, en este trabajo abordamos un problema propio de las líneas de montaje de modelos mixtos (MMAL) mediante una aplicación real vinculada a la planta de motores de Nissan en Barcelona (NMISA).

En concreto se estudia el problema de secuenciación de modelos mixtos (MMSP, Mixed-Model Sequencing Problem). Dicho problema consiste en establecer una biyección entre los elementos de un conjunto T (que enumeraremos $t = 1, \dots, T$) de ciclos de producción y los de un conjunto Ψ de productos. Los elementos del conjunto de productos, Ψ , se pueden agrupar en clases exclusivas ψ_i que cumplen $\Psi = \bigcup_{i \in I} \psi_i$ y $\psi_i \cap \psi_{i'} = \{\emptyset\} \quad \forall (i, i') \in I$, donde I es el conjunto de tipos de productos (que enumeraremos $i = 1, \dots, |I|$). Cada tipo de producto $i \in I$ requiere un tiempo de proceso $p_{i,k}$ ($i \in I; k \in K$) en cada estación de trabajo k del conjunto K de estaciones de la línea.

* Email addresses: joaquin.bautista@upc.edu (J Bautista), rocio.alfaro@upc.edu (R Alfaro)

A su vez, las estaciones de trabajo (dispuestas en serie) están compuestas por procesadores (operarios más robots y herramientas). Cada procesador dispone de un tiempo determinado, llamado tiempo de ciclo, c (medido a una actividad normal, α^N), para trabajar sobre los productos. Por este motivo, a pesar de que casi cualquier secuencia es técnicamente factible, no todas presentan el mismo impacto económico, pues dependiendo de la secuencia, el reparto de las cargas de trabajo a lo largo del tiempo y el consumo de componentes será uno u otro (Boysen, Flidner y Scholl, 2009). De hecho, si se secuencian consecutivamente tipos de producto con una carga de trabajo mayor al tiempo de ciclo puede que no sea posible que dicho procesador complete el trabajo total que se le requiere y, por tanto, se genere sobrecarga de trabajo. Esto puede ocurrir incluso cuando se concede a los procesadores de las estaciones de trabajo un tiempo superior al ciclo para trabajar sobre una unidad de producto; este tiempo, llamado ventana temporal (l_k) cumple $l_k - c \geq 0$. Lógicamente, si se lleva a cabo dicha retención en una estación, se producirá una reducción tanto en el tiempo disponible para operar sobre la siguiente unidad en esa estación, como en el disponible para trabajar sobre la misma unidad en la estación siguiente, lo cual puede dar lugar a la aparición de sobrecarga de trabajo o de pérdida de producción, si la ventana temporal no es suficiente para completar todo el trabajo requerido sobre la unidad (ver Figura 1a).

De forma similar, si se secuencian consecutivamente unidades de producto con una carga de trabajo inferior al tiempo de ciclo, los procesadores de las estaciones de trabajo pueden presentar tiempo inerte o desaprovechado (useless time) (ver Figura 1b).

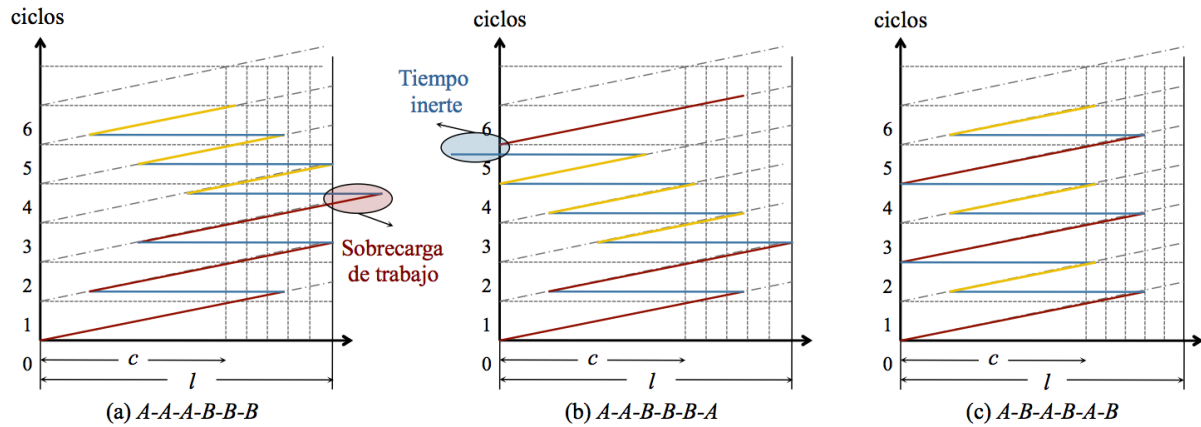


Figura 1. Sobrecarga (a), tiempo inerte (b) y trabajo completado en función de la secuencia.

Por todo lo anterior y sabiendo que en función de la distribución de las cargas de trabajo habrá más o menos sobrecarga y tiempo desaprovechado por los procesadores de las estaciones, en este trabajo proponemos una nueva variante del MMSP, cuyo objetivo es la minimización de los costes por pérdida de producción y tiempo inerte.

Además, considerando que los procesadores de las estaciones de trabajo son recursos humanos y, por tanto, su rendimiento varía a lo largo de la jornada de trabajo, esta nueva variante considerará tiempos de proceso de las operaciones variables en función del ritmo de trabajo o actividad de los operarios, siguiendo la línea de los trabajos presentados por Bautista, Alfaro-Pozo y Batalla-García (2015a y 2015b). De este modo, se favorecerá el objetivo original del MMSP-W (Yano y Rachamadugu, 1991; Scholl, Klein y Domschke, 1998), de maximizar el trabajo completado o reducir, lo máximo posible, el trabajo no completado. Evidentemente, siempre que sea necesario, un trabajador podrá aumentar su actividad de trabajo por encima de la normal (α^N), reduciendo

así el tiempo aparente de proceso de la operación y completando más trabajo requerido, evitando, incluso, la generación de sobrecarga de trabajo. Obviamente, los niveles de actividad de los trabajadores no podrán incumplir los límites establecidos mediante los convenios colectivos, en cuanto a nivel mínimo (α°) y máximo (α^*) de factor de actividad.

Por otra parte, la reducción de la sobrecarga dará lugar a una disminución de los costes por pérdida de producción. A su vez, la reducción del tiempo inerte o improductivo, a través de la penalización de sus costes, quedará reflejada en un incremento del trabajo total completado. Por tanto, los nuevos modelos matemáticos producirán unas ganancias económicas, debido a la recuperación de producción, haciendo útil aquel tiempo que antes se perdía.

En consecuencia, en este trabajo también se proponen diferentes criterios para compensar económicamente el sobre-esfuerzo solicitado a los trabajadores, dedicando una parte de las ganancias, conseguidas tras recuperar producción, a un fondo de primas o de pagas extra para los operadores.

2 Minimización de costes debidos al tiempo improductivo y a la sobrecarga de trabajo

2.1 PRELIMINARES

Son muchos los trabajos de la literatura que tratan sobre el MMSP y muchos los criterios de optimización considerados. Desde los pioneros Thomopoulos (1967), Macaskill (1973) y Okamura y Yamashina (1979), ya se pone de manifiesto la variedad de percepciones que existen sobre los factores controlables y las políticas de producción. En concreto, en estos trabajos se puede apreciar que el rango de criterios para definir los objetivos puede ir desde la minimización de los costes de ineficiencias, como son el tiempo ocioso, el sobre-esfuerzo, la concentración de altas cargas de trabajo, hasta la minimización del exceso de trabajo que deben realizar operarios auxiliares puntualmente (utility work), minimización de la longitud de la línea, etc. Eso sí, siempre buscando maximizar la eficiencia de la línea y, por tanto, reducir costes.

Sin embargo, son pocos los trabajos que consideran la presencia de recursos humanos en las líneas de producción, y consecuentemente, los que consideran tiempos variables en función del nivel de actividad de los trabajadores.

Por este motivo, utilizamos como referencia en este trabajo los modelos matemáticos que se presentan en diferentes trabajos previos (Alfaro, 2015; Bautista, Alfaro, 2015 y Bautista et al., 2015a,b). En concreto, aquí se han utilizado como punto de partida los modelos equivalentes $M3 \cup 4_{-\alpha I}$ y $M4 \cup 3_{-\alpha I}$ que contemplan la posibilidad de incrementar la productividad de la línea estableciendo un ritmo de trabajo idéntico en todas las estaciones y en cada ciclo por medio de un perfil del factor de actividad dependiente del tiempo y prefijado previamente.

A diferencia de los trabajos de referencia, en esta ocasión el ritmo de actividad de los trabajadores a lo largo del tiempo no será prefijado. Ahora, la actividad estará limitada superior e inferiormente, controlándola en cada ciclo productivo de jornada laboral en función de la carga de trabajo que haya.

De este modo, el tiempo inerte no se verá afectado por el nivel de actividad solicitado y se minimizarán simultáneamente los dos tipos de problemas presentes en una línea de montaje cuando los productos a ensamblar presentan tiempos de proceso variables; es decir se minimizará la sobrecarga de trabajo y el tiempo improductivo conjuntamente.

2.2 MODELOS CON FACTOR DE ACTIVIDAD ACOTADO

Proponemos dos modelos equivalentes que permiten controlar en cada ciclo y en cada estación de trabajo, tanto inferior como superiormente, la activación de los operadores con franjas del factor de actividad dependientes del ciclo de producción. Entre dichos límites, el factor de actividad de cada estación de trabajo puede tomar cualquier valor, por lo que, en este caso, las estaciones de trabajo no están sincronizadas en cuanto a ritmo de trabajo. Además, se incorpora a los modelos el concepto de tiempo inerte o desaprovechado (*useless time*), con el fin de no activar innecesariamente a los operarios.

Los parámetros y las variables de los nuevos modelos matemáticos son los siguientes:

Parámetros

K	Conjunto de estaciones de trabajo ($k = 1, \dots, K $)
b_k	Número de procesadores homogéneos en cada estación de trabajo k ($k = 1, \dots, K $)
I	Conjunto de tipos de producto ($i = 1, \dots, I $)
d_i	Demanda programada del tipo de producto i ($i = 1, \dots, I $)
$p_{i,k}$	Tiempo de proceso (a actividad normal) requerido a cada procesador homogéneo, por una unidad de producto de tipo i ($i = 1, \dots, I $) en la estación k ($k = 1, \dots, K $)
P_k	Tiempo de proceso (a actividad normal) requerido a cada procesador homogéneo de la estación k ($k = 1, \dots, K $), por el plan de demanda programada: $P_k = \sum_{i=1}^{ I } p_{i,k} d_i$
T, D	Demanda total. Coincide con el número de ciclos productivos de cualquier estación. Obviamente $\sum_{i=1}^{ I } d_i = T \equiv D$
t	Índice de posición en la secuencia ($t = 1, \dots, T $)
c	Tiempo de ciclo. Tiempo estándar asignado a cada procesador homogéneo de las estaciones de trabajo ($k = 1, \dots, K $) para tratar cualquier unidad de producto.
l_k	Ventana temporal. Tiempo máximo que se le permite, a cada procesador homogéneo de la estación k ($k = 1, \dots, K $), trabajar en cualquier unidad de producto; siendo $l_k - c > 0$ el tiempo máximo que se puede retener una unidad de producto en la estación k , una vez concluido el ciclo.
L_k	Tiempo presencial de los operadores en la estación k ($k = 1, \dots, K $) de la línea; equivale a la jornada laboral de los operadores asignados a la estación k : $L_k = c \cdot T + l_k - c$
$\dot{\alpha}_{k,t}^+$	Límite superior del factor dinámico de actividad de trabajo asociado a la t -ésima operación de la secuencia de productos ($t = 1, \dots, T$) en la estación k ($k = 1, \dots, K $)
$\dot{\alpha}_t^+$	Límite superior del factor dinámico de actividad de trabajo asociado al período t ($t = 1, \dots, T + K - 1$) de la jornada laboral extendida. Esta jornada laboral extendida incluye T ciclos de manufactura en la primera estación (demanda total) más $ K - 1$ ciclos adicionales, necesarios para completar el trabajo requerido por las unidades de producto en la última estación. Nótese que si se asocia el mismo límite superior del factor dinámico a cada momento de la jornada laboral en todas las estaciones de trabajo, se tiene: $\dot{\alpha}_{k,t}^+ = \dot{\alpha}_{t+ K -1}^+$ ($k = 1, \dots, K $; $t = 1, \dots, T$)
$\dot{\alpha}_{k,t}^-$	Límite inferior del factor dinámico de actividad de trabajo asociado a la t -ésima operación de la secuencia de productos ($t = 1, \dots, T$) en la estación k ($k = 1, \dots, K $)
$\dot{\alpha}_t^-$	Límite inferior del factor dinámico de actividad de trabajo asociado al período t ($t = 1, \dots, T + K - 1$) de la jornada laboral extendida. Si se asocia el mismo límite inferior del factor dinámico a cada momento de la jornada laboral en todas las estaciones de trabajo, se tiene:

	$\dot{\alpha}_{k,t}^- = \dot{\alpha}_{t+k-1}^- \quad (k=1,\dots, K ; t=1,\dots,T)$
γ_w	Coste por unidad de sobrecarga. Se asocia a la caída de producción medida a través de la sobrecarga de trabajo.
γ_b	Coste por unidad de tiempo de un procesador.
γ_U	Coste por unidad de tiempo inerte o desperdiciado. Aquí supondremos: $\gamma_U = \gamma_b$

Variables	
$x_{i,t}$	Variable binaria que adopta el valor 1 si una unidad de producto i ($i=1,\dots, I $) se asigna a la posición t ($t=1,\dots,T$) de la secuencia, y valor 0 en caso contrario.
$\hat{s}_{k,t}$	Diferencia positiva entre el instante de inicio real y el mínimo instante de inicio de la t -ésima operación de la estación de trabajo k
$\rho_{k,t}$	Tiempo de proceso (a actividad normal) requerido a cada procesador homogéneo, por la t -ésima t ($t=1,\dots,T$) unidad de producto en la estación k ($k=1,\dots, K $)
$v_{k,t}$	Tiempo de proceso aplicado, por cada procesador homogéneo (a actividad normal), a la t -ésima unidad de producto secuenciada en la estación k ($k=1,\dots, K $). Equivale al trabajo completado sobre el trabajo requerido ($\rho_{k,t}$).
$\hat{v}_{k,t}$	Tiempo de proceso aplicado, por cada procesador homogéneo (a actividad real $\dot{\alpha}_{k,t}$), a la t -ésima unidad de producto secuenciada en la estación k ($k=1,\dots, K $).
$w_{k,t}$	Sobrecarga de trabajo generada en cada procesador homogéneo, medida en tiempo a actividad normal, por la t -ésima unidad de producto secuenciada en la estación de trabajo k ($k=1,\dots, K $)
V	Tiempo total de proceso aplicado a actividad normal. Trabajo total completado.
W	Sobrecarga total de trabajo o pérdida de producción total.
U_k	Tiempo inerte o desaprovechado (<i>useless time</i>) por cada procesador en la estación k ($k=1,\dots, K $), medido a actividad normal ¹ .
$\dot{\alpha}_{k,t}$	Factor dinámico de actividad de trabajo asociado a la t -ésima operación ($t=1,\dots,T$) de la secuencia de productos en la estación k ($k=1,\dots, K $), determinado a partir de los tiempos de proceso aplicados a actividad normal y real: $\dot{\alpha}_{k,t} = \hat{v}_{k,t}/v_{k,t} \Rightarrow \hat{v}_{k,t} = v_{k,t}(\dot{\alpha}_{k,t})$
$\tilde{v}_{k,t}$	Tiempo de proceso recuperado (<i>recovered processing time</i>) por cada procesador homogéneo, medido a actividad normal, en la t -ésima unidad de producto secuenciada en la estación k ($k=1,\dots, K $)
Γ	Coste total operativo: suma de costes por pérdida de producción debida a la sobrecarga total (Γ_w) más el coste total del tiempo desaprovechado (Γ_U).

¹ En los modelos propuestos, se mide y penaliza el tiempo inerte durante el tiempo presencial L_k .

Modelo $M1_ \Gamma$:

$$\text{Min } \Gamma = \Gamma_W + \Gamma_U = \gamma_W \sum_{k=1}^{|K|} \left(b_k \sum_{t=1}^T w_{k,t} \right) + \gamma_U \sum_{k=1}^{|K|} b_k U_k \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{t=1}^T x_{i,t} = d_i \quad (\forall i = 1, \dots, |I|) \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{|I|} x_{i,t} = 1 \quad (\forall t = 1, \dots, T) \quad (3)$$

$$\rho_{k,t} = \sum_{i=1}^{|I|} p_{i,k} x_{i,t} \quad (\forall k = 1, \dots, |K|); (\forall t = 1, \dots, T) \quad (4)$$

$$v_{k,t} + w_{k,t} = \rho_{k,t} \quad (\forall k = 1, \dots, |K|); (\forall t = 1, \dots, T) \quad (5)$$

$$v_{k,t} - \dot{\alpha}_{t+k-1}^+ \cdot \hat{v}_{k,t} \leq 0 \quad (\forall k = 1, \dots, |K|); (\forall t = 1, \dots, T) \quad (6)$$

$$v_{k,t} - \dot{\alpha}_{t+k-1}^- \cdot \hat{v}_{k,t} \geq 0 \quad (\forall k = 1, \dots, |K|); (\forall t = 1, \dots, T) \quad (7)$$

$$s_{k,t} \geq s_{k,t-1} + \hat{v}_{k,t-1} \quad (\forall k = 1, \dots, |K|); (\forall t = 2, \dots, T) \quad (8)$$

$$s_{k,t} \geq s_{k-1,t} + \hat{v}_{k-1,t} \quad (\forall k = 2, \dots, |K|); (\forall t = 1, \dots, T) \quad (9)$$

$$s_{k,t} + \hat{v}_{k,t} \leq (t+k-2) \cdot c + l_k \quad (\forall k = 1, \dots, |K|); (\forall t = 1, \dots, T) \quad (10)$$

$$s_{k,t} \geq (t+k-2) \cdot c \quad (\forall k = 1, \dots, |K|); (\forall t = 1, \dots, T) \quad (11)$$

$$U_k + \sum_{t=1}^T \hat{v}_{k,t} = L_k \quad (\forall k = 1, \dots, |K|) \quad (12)$$

$$U_k, v_{k,t}, \hat{v}_{k,t}, w_{k,t} \geq 0 \quad (\forall k = 1, \dots, |K|); (\forall t = 1, \dots, T) \quad (13)$$

$$x_{i,t} \in \{0, 1\} \quad (\forall i = 1, \dots, |I|); (\forall t = 1, \dots, T) \quad (14)$$

Modelo $M2_ \Gamma$:

$$\text{Min } \Gamma = \Gamma_W + \Gamma_U = \gamma_W \sum_{k=1}^{|K|} \left(b_k \sum_{t=1}^T w_{k,t} \right) + \gamma_U \sum_{k=1}^{|K|} b_k U_k \quad (15)$$

Sujeto a:

$$\sum_{t=1}^T x_{i,t} = d_i \quad (\forall i = 1, \dots, |I|) \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^{|I|} x_{i,t} = 1 \quad (\forall t = 1, \dots, T) \quad (17)$$

$$\rho_{k,t} = \sum_{i=1}^{|I|} p_{i,k} x_{i,t} \quad (\forall k = 1, \dots, |K|); (\forall t = 1, \dots, T) \quad (18)$$

$$v_{k,t} + w_{k,t} = \rho_{k,t} \quad (\forall k = 1, \dots, |K|); (\forall t = 1, \dots, T) \quad (19)$$

$$v_{k,t} - \dot{\alpha}_{t+k-1}^+ \cdot \hat{v}_{k,t} \leq 0 \quad (\forall k = 1, \dots, |K|); (\forall t = 1, \dots, T) \quad (20)$$

$$v_{k,t} - \dot{\alpha}_{t+k-1}^- \cdot \hat{v}_{k,t} \geq 0 \quad (\forall k = 1, \dots, |K|); (\forall t = 1, \dots, T) \quad (21)$$

$$\hat{s}_{k,t} \geq \hat{s}_{k,t-1} + \hat{v}_{k,t-1} - c \quad (\forall k = 1, \dots, |K|); (\forall t = 2, \dots, T) \quad (22)$$

$$\hat{s}_{k,t} \geq \hat{s}_{k-1,t} + \hat{v}_{k-1,t} - c \quad (\forall k = 2, \dots, |K|); (\forall t = 1, \dots, T) \quad (23)$$

$$\hat{s}_{k,t} + \hat{v}_{k,t} \leq l_k \quad (\forall k = 1, \dots, |K|); (\forall t = 1, \dots, T) \quad (24)$$

$$U_k + \sum_{t=1}^T \hat{v}_{k,t} = L_k \quad (\forall k = 1, \dots, |K|) \quad (25)$$

$$U_k, \hat{s}_{k,t}, v_{k,t}, \hat{v}_{k,t}, w_{k,t} \geq 0 \quad (\forall k = 1, \dots, |K|); (\forall t = 1, \dots, T) \quad (26)$$

$$x_{i,t} \in \{0, 1\} \quad (\forall i = 1, \dots, |I|); (\forall t = 1, \dots, T) \quad (27)$$

$$\hat{s}_{1,1} = 0 \quad (28)$$

En los modelos $M1_\Gamma$ y $M2_\Gamma$ las funciones objetivo (1) y (15) representan la minimización de los costes totales debidos a la pérdida de producción y al tiempo desaprovechado. Las restricciones (2) – (5) y (16) – (19), procedentes de los modelos de referencia, fuerzan que la demanda sea satisfecha, indican que sólo una unidad de producto puede ser asignada en cada posición de la secuencia, determinan el tiempo de proceso requerido por unidad de producto y posición de la secuencia y limitan el tiempo de proceso aplicado a cada unidad de producto en cada estación de trabajo, al tiempo de proceso requerido, respectivamente. El conjunto de restricciones (8) – (11) y (22) – (24), también procedentes de los modelos de referencia, establecen los instantes de inicio de las operaciones en las estaciones de trabajo. Por otro lado, las nuevas ecuaciones, (12) y (25), sirven para definir el tiempo inerte de cada estación en función del tiempo total disponible y del tiempo de proceso aplicado a todas las operaciones. Por su lado, las nuevas restricciones (6) y (20) por un lado y las (7) y (21) por otro, limitan superior e inferiormente la actividad de los operadores en cada estación y en cada ciclo cuando los perfiles limitativos del factor de actividad están sincronizados. Las restricciones (13) – (14) y (26) – (27) fuerzan la no-negatividad de los tiempos de las variables, y establecen las variables de asignación como variables binarias. Finalmente, en la ecuación (28) se fija el instante de inicio de las operaciones.

Cabe destacar que los modelos $M1_\Gamma$ y $M2_\Gamma$ son útiles para determinar el factor de actividad de los operadores, en cada estación y en cada periodo, más adecuado para reducir pérdidas de producción – igualdad (29) –, así como el tiempo de proceso recuperado por cada procesador homogéneo activado a dicho ritmo de trabajo – igualdad (30) –.

$$\dot{\alpha}_{k,t} = v_{k,t} / \hat{v}_{k,t} \quad (\forall k = 1, \dots, |K|); (\forall t = 1, \dots, T) \quad (29)$$

$$\tilde{v}_{k,t} = v_{k,t} - \hat{v}_{k,t} \quad (\forall k = 1, \dots, |K|); (\forall t = 1, \dots, T) \quad (30)$$

3 Compensación económica por incremento de productividad

Es evidente que es posible conseguir una reducción sustancial del coste por pérdida de producción (Γ_w) gracias al sobreesfuerzo de los operadores cuando éstos trabajan por encima del ritmo marcado por la actividad normal ($\dot{\alpha}_{k,t}^N = 1$). Además, una reducción del tiempo inerte, a través de la penalización de sus costes (Γ_U), debe quedar reflejada en un incremento del trabajo total completado (V).

Pensamos que dicho sobreesfuerzo debería ser recompensado económicamente por la compañía, dedicando una parte de las ganancias, conseguidas tras recuperar producción, a un fondo de primas o de pagas extra para los operadores.

Los operadores u operarios forman parte de los procesadores de las estaciones de la línea, por lo que nuestra propuesta es compensar de la misma forma a todos los operadores de un mismo procesador. Si, además, los procesadores de una misma estación son homogéneos, concluiremos que todos los operadores de una misma estación deben gozar de la misma prima.

3.1 MÉTRICAS PARA LA COMPENSACIÓN ECONÓMICA

La compensación económica puede hacerse de dos maneras como mínimo:

- (a) Mediante el Reparto Proporcional de un fondo común, en función del sobreesfuerzo de cada estación.
- (b) Estableciendo un valor económico a la unidad de sobreesfuerzo (v.g. γ_b), y convirtiendo así el esfuerzo individual y/o colectivo en unidades monetarias.

Por otra parte, teniendo en cuenta la medida (b), para medir el sobreesfuerzo de los operadores en cada estación y ciclo proponemos dos métricas:

- (1) Sobreactividad respecto a la normal.
- (2) Tiempo de proceso recuperado (transformación de sobrecarga de trabajo en trabajo completado).

Atendiendo a la opción (b-1), la compensación económica por sobreactividad, en la estación y en el ciclo, se determinara así:

$$g_{k,t}^1 = \begin{cases} \gamma_b \cdot b_k (\dot{\alpha}_{k,t} - 1)c, & \text{si } t = 1, \dots, T-1 \\ \gamma_b \cdot b_k (\dot{\alpha}_{k,T} - 1)l_k, & \text{si } t = T \end{cases} \quad (\forall k = 1, \dots, |K|) \quad (31)$$

Por tanto, la compensación económica, según la opción (b-1), por jornada de trabajo presencial en la estación k debe ser:

$$G_k^1 = \sum_{t=1}^T g_{k,t}^1 = \gamma_b \cdot b_k [(\bar{\alpha}_k - 1)c \cdot T + (\dot{\alpha}_{k,T} - 1)(l_k - c)] \quad (\forall k = 1, \dots, |K|) \quad (32)$$

Donde $\bar{\alpha}_k$ es la media de los factores dinámicos de actividad de trabajo en la estación $k \in K$.

Por su parte, la compensación económica por tiempo de proceso recuperado (opción 2-b), en la estación k y en el ciclo t , se obtiene de la forma siguiente:

$$g_{k,t}^2 = \gamma_b \cdot b_k \cdot \tilde{v}_{k,t} = \begin{cases} \gamma_b \cdot b_k (v_{k,t} - \hat{v}_{k,t}) \\ \gamma_b \cdot b_k (\dot{\alpha}_{k,t} - 1)\hat{v}_{k,t} \\ \gamma_b \cdot b_k (1 - 1/\dot{\alpha}_{k,t})v_{k,t} \end{cases} \quad (\forall k = 1, \dots, |K|); (\forall t = 1, \dots, T) \quad (33)$$

Y, en consecuencia, la compensación económica, según la opción b-2, por jornada laboral activa en la estación k debe ser:

$$G_k^2 = \sum_{t=1}^T g_{k,t}^2 = \gamma_b \cdot b_k \sum_{t=1}^T \tilde{v}_{k,t} = \left\{ \begin{array}{l} \gamma_b \cdot b_k (V_k - \hat{V}_k) \\ \gamma_b \cdot b_k (\hat{\alpha}_k - 1) \hat{V}_k \\ \gamma_b \cdot b_k (1 - 1/\hat{\alpha}_k) V_k \end{array} \right\} \quad (\forall k = 1, \dots, |K|) \quad (34)$$

Donde $\hat{\alpha}_k$ es la media de los factores dinámicos de actividad de trabajo ($\hat{\alpha}_{k,t}$), ponderados por los tiempos de proceso aplicados ($\hat{v}_{k,t}$), V_k es el trabajo completado y \hat{V}_k es el tiempo de proceso aplicado, en la estación $k \in K$. La Figura 2 muestra la relación de estas variables y parámetros con la compensación económica normalizada asignable a un procesador.

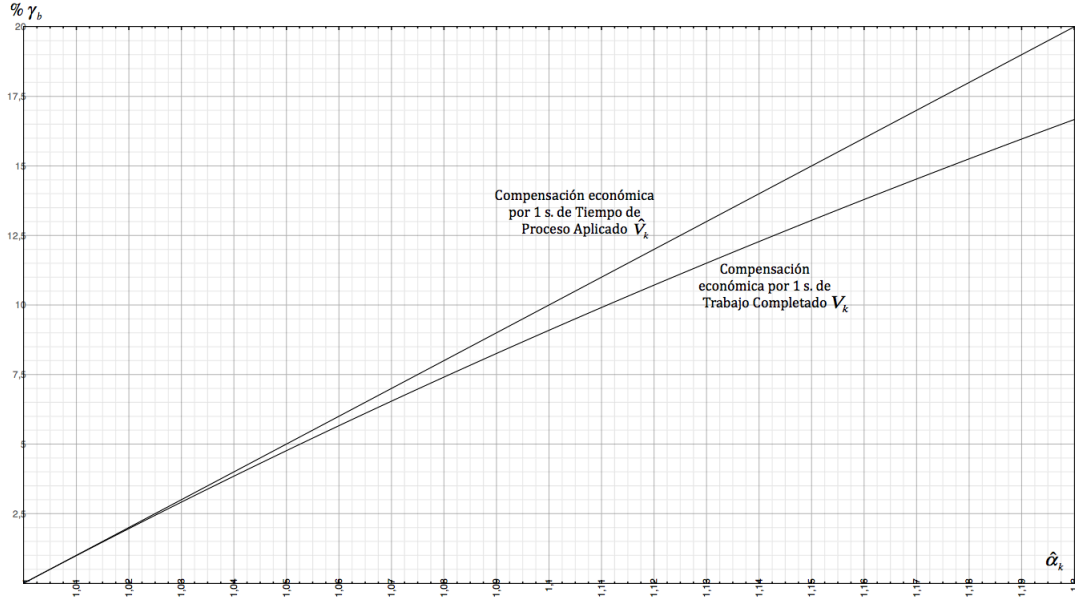


Figura 2. Compensación económica($\% \gamma_b$), según el criterio del tiempo de proceso recuperado (b-2), en función la actividad $\hat{\alpha}_k$, el trabajo completado V_k y el tiempo de proceso aplicado \hat{V}_k .

Obviamente, las compensaciones económicas ofrecidas por los criterios (b-1) y (b-2) no serán idénticas en todos los casos. En efecto, el criterio (b-1) tiene en cuenta el tiempo presencial de los operarios en la línea en una jornada –sin considerar la penalización (no compensación) por tiempos inertes– y los niveles de activación en cada ciclo; por su parte, el criterio (b-2) sólo considera el premio al tiempo activo de los operadores con el ritmo de trabajo al que estén sometidos.

3.2 ALGUNAS PROPIEDADES Y PRIMERAS CONCLUSIONES SOBRE LA COMPENSACIÓN ECONÓMICA

Dedicamos este apartado a resaltar una serie de propiedades sobre la compensación económica a los operadores en función de los criterios empleados (b-1 o b-2).

Teorema 1: Si el factor dinámico de actividad ($\dot{\alpha}_{k,t}$) es homogéneo en el tiempo en una estación $k \in K$, la compensación económica ofrecida por el criterio b-1 es mayor o igual que la ofrecida por el criterio b-2.

Demostración:

Sea $\dot{\alpha}_{k,t}$ homogénea en t , i.e. $\dot{\alpha}_{k,t} = \dot{\alpha}_k \forall t = 1, \dots, T$, entonces, $\hat{\alpha}_k = \bar{\alpha}_k = \dot{\alpha}_k$

$$(i) \hat{\alpha}_k = \dot{\alpha}_k \Rightarrow G_k^2 = \gamma_b \cdot b_k (\hat{\alpha}_k - 1) \hat{V}_k = \gamma_b \cdot b_k (\dot{\alpha}_k - 1) \hat{V}_k$$

$$(ii) \hat{V}_k \leq (c \cdot T + l_k - c) \Rightarrow G_k^2 \leq \gamma_b \cdot b_k (\dot{\alpha}_k - 1) (c \cdot T + l_k - c)$$

$$(iii) \bar{\alpha}_k = \dot{\alpha}_k \Rightarrow G_k^1 = \gamma_b \cdot b_k [(\bar{\alpha}_k - 1)c \cdot T + (\dot{\alpha}_{k,T} - 1)(l_k - c)] = \gamma_b \cdot b_k (\dot{\alpha}_k - 1) (c \cdot T + l_k - c)$$

Por tanto, $G_k^1 \geq G_k^2$

Teorema 2: Si $\dot{\alpha}_{k,t}$ es homogéneo en el tiempo en una estación $k \in K$ y el tiempo inerte U_k es nulo en dicha estación, entonces las compensaciones económicas ofrecidas por los criterios b-1 y b-2 son idénticas.

Demostración:

$$(i) U_k = 0 \Rightarrow \hat{V}_k = c \cdot T + l_k - c$$

$$(ii) \hat{\alpha}_k = \dot{\alpha}_k \Rightarrow G_k^2 = \gamma_b \cdot b_k (\dot{\alpha}_k - 1) \hat{V}_k = \gamma_b \cdot b_k (\dot{\alpha}_k - 1) (c \cdot T + l_k - c)$$

$$(iii) \bar{\alpha}_k = \dot{\alpha}_k \Rightarrow G_k^1 = \gamma_b \cdot b_k (\dot{\alpha}_k - 1) (c \cdot T + l_k - c)$$

Por tanto: $G_k^1 = G_k^2$

Teorema 3: Si en una estación $k \in K$ se cumple que $l_k = c$ (sin holgura en la ventana temporal) entonces la compensación económica ofrecida por el criterio b-1 es mayor o igual que la ofrecida por el criterio b-2 en dicha estación.

Demostración:

$$(i) l_k = c \Rightarrow \hat{v}_{k,t} \leq c \forall t = 1, \dots, T$$

$$(ii) \sum_{t=1}^T (\dot{\alpha}_{k,t} - 1) \cdot c \geq \sum_{t=1}^T (\dot{\alpha}_{k,t} - 1) \cdot \hat{v}_{k,t}$$

$$(iii) \gamma_b \cdot b_k \sum_{t=1}^T (\dot{\alpha}_{k,t} - 1) \cdot c \geq \gamma_b \cdot b_k \sum_{t=1}^T (\dot{\alpha}_{k,t} - 1) \cdot \hat{v}_{k,t}$$

Por tanto: $G_k^1 \geq G_k^2$

Teorema 4: Si en una estación $k \in K$ se cumple que $l_k = c$ (sin holgura en la ventana temporal) y el tiempo inerte es igual a cero en dicha estación, la compensación económica ofrecida por ambos criterios (b-1 y b-2) es idéntica.

Demostración:

$$(i) (l_k = c) \wedge (U_k = 0) \Rightarrow \hat{v}_{k,t} = c \forall t = 1, \dots, T$$

$$(ii) G_k^1 = \gamma_b \cdot b_k \sum_{t=1}^T (\dot{\alpha}_{k,t} - 1) \cdot c = \gamma_b \cdot b_k (\bar{\alpha}_k - 1) c \cdot T$$

$$(iii) G_k^2 = \gamma_b \cdot b_k \sum_{t=1}^T (\dot{\alpha}_{k,t} - 1) \cdot \hat{v}_{k,t} = \gamma_b \cdot b_k \sum_{t=1}^T (\dot{\alpha}_{k,t} - 1) \cdot c = \gamma_b \cdot b_k (\bar{\alpha}_k - 1) c \cdot T$$

Por tanto: $G_k^1 = G_k^2$

Teorema 5: Si la sobrecarga w_k en la estación $k \in K$ es igual a cero, la máxima compensación económica según el criterio b-2 se alcanza consiguiendo que el tiempo de proceso aplicado \hat{v}_k sea mínimo.

Demostración:

$$(i) W_k = 0 \Rightarrow V_k = P_k$$

$$(ii) G_k^2 = \gamma_b \cdot b_k (V_k - \hat{V}_k) = \gamma_b \cdot b_k (P_k - \hat{V}_k)$$

$$(iii) G_k^2 = Cte - \gamma_b \cdot b_k \cdot \hat{V}_k$$

$$\text{Por tanto: } \text{Max } G_k^2 \Leftrightarrow \text{Min } \hat{V}_k$$

Teorema 6: Si la sobrecarga w_k en la estación $k \in K$ es nula, la máxima compensación económica según el criterio b-2 se alcanza cuando la actividad media ponderada $\hat{\alpha}_k$ es máxima.

Demostración:

$$(i) W_k = 0 \Rightarrow V_k = P_k$$

$$(ii) G_k^2 = \gamma_b \cdot b_k (1 - 1/\hat{\alpha}_k) V_k = \gamma_b \cdot b_k (1 - 1/\hat{\alpha}_k) P_k$$

$$(iii) G_k^2 = Cte \cdot (1 - 1/\hat{\alpha}_k)$$

$$\text{Por tanto: } \Rightarrow \text{Max } G_k^2 \Leftrightarrow \text{Max } \hat{\alpha}_k$$

4 Experiencia computacional

Con el fin de evaluar los modelos matemáticos propuestos en este trabajo utilizamos un caso de estudio basado en una línea de ensamblaje de motores de Nissan en Barcelona. En base a un plan de producción (ver mix 1 en Tabla 7 de Bautista, Cano y Alfaro, 2012) correspondiente a un día de trabajo de la línea de motores (dos turnos de trabajo de 6.56 horas de trabajo efectivas²), evaluamos el efecto de la libre activación de los operadores sobre la sobrecarga de trabajo y el tiempo improductivo y, consecuentemente, sobre los costes productivos.

En concreto, compararemos los modelos $M1_\Gamma$ y $M2_\Gamma$ con los modelos de referencia $M3 \cup 4_{\hat{\alpha}I}$ y $M4 \cup 3_{\hat{\alpha}I}$ y con los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, que no contemplan tiempos variables en función de la activación de los trabajadores. Para ello se consideran las siguientes características del caso de estudio:

- El plan de producción debe satisfacer una demanda total de $T = 270$ motores, divididos equitativamente en 9 tipos de motores (30 motores de cada tipo). Cada tipo de motor requiere un tiempo de proceso a cada estación de trabajo (ver Tabla 6 de Bautista, Cano y Alfaro, 2012).
- Los 270 motores se ensamblan en una línea de 21 estaciones de trabajo, $|K| = 21$, dispuestas en serie, con un único procesador homogéneo en cada una de ellas ($b_k = 1, \forall k \in K$). Este procesador homogéneo, es equivalente a un equipo de dos trabajadores con idénticas habilidades y herramientas y mismo requerimiento de equipos auxiliares.
- El tiempo de ciclo efectivo es $c = 175$ s, y la ventana temporal, considerada idéntica para todas las estaciones de trabajo, es igual a $l_k = 195$ s.
- Para los modelos de referencia, con perfil de actividad pre-fijado, se utilizará un perfil escalón, adaptando el ritmo de trabajo de los operarios de la línea según los momentos del turno de trabajo (adaptación – activación – fatiga). En concreto, el factor de actividad normal y máximo permitido será $\alpha^N = 1.0$, $\alpha^{\max} = 1.1$, respectivamente y los instantes de transición entre un

² Horas de trabajo resultantes tras descontar los descansos y las paradas reglamentarias.

ritmo de actividad y otro serán $t_0 = 45$, $t_{med} = 67$ y $t_\infty = 91$ para el turno 1 (Shift 1) y $t_0 = 180$, $t_{med} = 202$ y $t_\infty = 226$ para el turno 2 (Shift 2), tal y como puede apreciarse en la Figura 3.

- En el caso de los nuevos modelos, en los que la actividad es libre dentro de un límite superior e inferior, se considera un límite inferior igual a la actividad normal $\dot{\alpha}_t^- = \alpha^N = 1.0 \quad \forall t$, y un límite superior igual al factor de actividad máximo del perfil escalón, $\dot{\alpha}_t^+ = \alpha^{\max} = 1.1 \quad t_0 \leq t \leq t_\infty$, lo que supone un aumento máximo del 10% durante un tercio de la jornada laboral.
- Teniendo en cuenta que el Consolidated Operating Profit (COP) de la línea de motores del caso de estudio es del 10% sobre el beneficio de un motor y que este beneficio es de 4000€, la pérdida de un motor supone un coste económico de 400€. A su vez, considerando que la línea produce un motor cada 175 s, el coste por unidad de sobrecarga, asociado a la caída de producción medida a través de la sobrecarga de trabajo, es de $\gamma_w = 2,28 \text{ €/s}$.
- Fijando que el coste horario en España³, en el sector de automoción, es de 20 €/h, el coste por segundo de trabajo de un procesador, y por tanto, el coste por unidad de tiempo inerte o desaprovechado, es de $\gamma_b = \gamma_U = 0,0055 \text{ €/s}$.

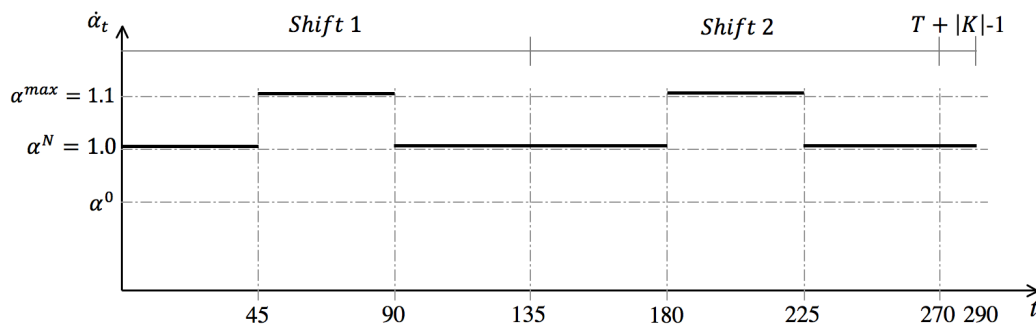


Figura 3. Función escalón para el factor de ritmo de trabajo en el caso de Nissan.

Tras la explotación de los modelos, mediante el LP Solver de Gurobi Optimizer 4.5.0, en un ordenador Apple Macintosh iMac, con procesador Intel Core i7 2.93 GHz, con 8 GB de memoria RAM y con sistema operativo MAC OS X 10.6.7, limitando el tiempo de CPU para cada plan de producción a 7200 s, se han obtenido los siguientes resultados (Tabla-1).

	$M3 \cup 4$	$M4 \cup 3$	$M3 \cup 4_{-\dot{\alpha}I}$	$M4 \cup 3_{-\dot{\alpha}I}$	$M1_{-\Gamma}$	$M2_{-\Gamma}$
W	300,00	306,00	0,00	0,00	28,00	90,00
U	185.427,00	185.392,00	209.744,96	209.734,39	185.804,00	185.705,00
Γ_w	685,71	699,43	0,00	0,00	64,00	205,71
Γ_U	1.030,15	1.029,96	1.159,90	1.159,86	1.032,25	1.031,70
Γ	1.715,87	1.729,38	1.159,90	1.159,86	1.096,25	1.237,41
GAP	82,67%	83,38%	0,00%	0,00%	6,16%	16,91%

Tabla 1. Sobrecarga W (segundos), tiempo inerte U (segundos), costes totales por pérdida de producción y tiempo inerte (Γ) (€/día) y distancia de la solución a la mejor cota encontrada por el solver, GAP (%), obtenidos por los modelos $M3 \cup 4$, $M4 \cup 3$, $M3 \cup 4_{-\dot{\alpha}I}$, $M4 \cup 3_{-\dot{\alpha}I}$, $M1_{-\Gamma}$ y $M2_{-\Gamma}$.

³ El coste horario de un operario en España, en el sector de la automoción, está entre 20 y 25 €/h

Tal y como se puede apreciar en la Tabla 1, los únicos modelos que alcanzan la solución óptima en las 2 horas concedidas de tiempo de CPU son los modelos de referencia de este trabajo ($M3\cup4_aI$ y $M4\cup3_aI$), obteniendo el menor valor de sobrecarga global (0 segundos de trabajo no completado en ambos casos). Sin embargo, tal y como era de esperar los modelos de referencia son los que proporcionan más tiempo desaprovechado, más de 208,000s en los que los operarios no están trabajando sobre ninguna unidad de producto. Por su lado, los modelos propuestos en este trabajo, proporcionan los mejores valores en cuanto al tiempo inerte, lo cual es de esperar por ser los únicos modelos que contemplan este concepto en la optimización. Finalmente, los modelos que no consideran activación por parte de los operarios, $M3\cup4$ y $M4\cup3$, son los que obtienen más sobrecarga de trabajo, por lo que son los que mayores costes suponen.

Obviamente, en el caso de los modelos de referencia, $M3\cup4$, $M4\cup3$, $M3\cup4_aI$ y $M4\cup3_aI$, tanto el tiempo desaprovechado como el coste total por pérdida de producción y tiempo desaprovechado, se han calculado a partir de la solución obtenida para cada modelo.

Es fácil observar que parte de la sobrecarga W y del tiempo inerte U se debe al programa de producción establecido sin depender de la secuencia. Es decir, habrá una sobrecarga inevitable $W_k^\circ(\bar{\alpha}_k)$, dependiente de la estación de trabajo y del factor de actividad de los procesadores, y un tiempo inevitable $U_k^\circ(\alpha^N)$ independiente de la actividad pero dependiente de la estación; estos valores inevitables se calculan así:

$$W_k^\circ(\bar{\alpha}_k) = b_k \cdot \max\{0, P_k(\bar{\alpha}_k) - L_k\} \quad (\forall k = 1, \dots, |K|) \quad (35)$$

$$U_k^\circ(\alpha^N) = b_k \cdot (L_k - V_k^\circ(\alpha^N)) \quad (\forall k = 1, \dots, |K|) \quad (36)$$

Siendo:

$$P_k(\bar{\alpha}_k) \equiv \text{trabajo requerido a una actividad media } \bar{\alpha}_k \text{ en } k \in K; \quad (37)$$

$$P_k(\bar{\alpha}_k) = \sum_{i=1}^{|I|} \frac{P_{i,k}}{\bar{\alpha}_k} \cdot d_i \quad (\forall k = 1, \dots, |K|)$$

$$V_k^\circ(\alpha^N) = P_k(\alpha^N) - W_k^\circ(\alpha^N) \quad (\forall k = 1, \dots, |K|) \quad (38)$$

Abusando de notación, haremos $W_k^\circ = W_k^\circ(\alpha^N)$, $U_k^\circ = U_k^\circ(\alpha^N)$ y $V_k^\circ = V_k^\circ(\alpha^N)$.

Teniendo en cuenta el conjunto K de estaciones de trabajo, los valores globales para toda la línea son:

$$W^\circ(\bar{\alpha}_k) = \sum_{k=1}^{|K|} W_k^\circ(\bar{\alpha}_k) \quad (39)$$

$$V^\circ = \sum_{k=1}^{|K|} V_k^\circ \quad (40)$$

$$U^\circ = \sum_{k=1}^{|K|} U_k^\circ \quad (41)$$

Consecuentemente, la sobrecarga de trabajo y el tiempo inerte activos y penalizables en costes son:

$$\hat{W} = W - W^\circ(\bar{\alpha}_k) \quad (\forall k = 1, \dots, |K|) \quad (42)$$

$$\hat{U} = U - U^\circ \quad (\forall k = 1, \dots, |K|) \quad (43)$$

A partir de las igualdades (35) y (36), calculamos la sobrecarga y el tiempo inerte inevitables correspondientes al plan de producción utilizado en la experiencia computacional. Para ello, para el cálculo de la sobrecarga inevitable correspondiente a los modelos con activación, fijamos la actividad media máxima de las estaciones de trabajo en $\bar{\alpha}_k = 1,033$, valor correspondiente a la función escalón utilizada. Obviamente, el valor de la sobrecarga inevitable será idéntica para los casos en los que se permita activación por parte de los procesadores, y tendrá un valor mayor para el caso de los modelos originales, $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, donde no se activa a los procesadores. En cambio el valor mínimo de tiempo inerte será idéntico en todos los casos.

Con los valores estáticos o inevitables calculados previamente, y considerando la expresiones (42) y (43), determinamos los costes activos por las pérdidas de producción ($\hat{\Gamma}_w$) y por el tiempo desaprovechado ($\hat{\Gamma}_u$) según las secuencias obtenidas mediante los modelos de optimización (ver Tabla 2).

	$M3 \cup 4$	$M4 \cup 3$	$M3 \cup 4_{\dot{\alpha}I}$	$M4 \cup 3_{\dot{\alpha}I}$	$M1_{\Gamma}$	$M2_{\Gamma}$
W°	50,00	50,00	0,00	0,00	0,00	0,00
V°	807.370,00	807.370,00	807.420,00	807.420,00	807.420,00	807.420,00
U°	185.300,00	185.300,00	185.300,00	185.300,00	185.300,00	185.300,00
\hat{W}	250,00	256,00	0,00	0,00	28,00	90,00
\hat{U}	127,00	92,00	23.481,96	23.475,39	504,00	405,00
$\hat{\Gamma}$	572,13	585,65	130,46	130,42	66,80	207,96

Tabla 2. Sobrecarga activa (\hat{W}), tiempo inerte activo (\hat{U}), coste activo total ($\hat{\Gamma} = \hat{\Gamma}_w + \hat{\Gamma}_u$) de los modelos $M3 \cup 4$, $M4 \cup 3$, $M3 \cup 4_{\dot{\alpha}I}$, $M4 \cup 3_{\dot{\alpha}I}$, $M1_{\Gamma}$ y $M2_{\Gamma}$.

Como vemos en la Tabla 2, la consideración del tiempo inerte estático ha reducido considerablemente los costes asociados a la pérdida de productividad de la línea. Sin embargo, si tenemos en cuenta nuestra idea de recompensar económicamente el sobre esfuerzo de los operadores cuando éstos trabajan por encima del ritmo marcado por la actividad normal, a estos costes hay que sumar los costes de compensación, calculados a partir de las ecuaciones (32) y (34) (Tabla 3).

Obviamente en la tabla 3 no aparecen los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, por no considerar la activación de los trabajadores para aumentar la productividad y, por tanto, por no exigir un sobre esfuerzo. Por otro lado, vemos que los modelos de referencia $M3 \cup 4_{\dot{\alpha}I}$ y $M4 \cup 3_{\dot{\alpha}I}$, suponen una mayor compensación económica, ya que fuerzan que todas las estaciones trabajen con el mismo factor de actividad por instante de tiempo. Esto provoca que los operarios realicen un sobre esfuerzo a pesar de que no sea necesario para reducir la sobrecarga y además generen mayor cantidad de tiempo inerte.

	$M3 \cup 4_{\dot{\alpha}I}$		$M4 \cup 3_{\dot{\alpha}I}$		$M1_{\Gamma}$		$M2_{\Gamma}$	
$k \in K$	G_k^1	G_k^2	G_k^1	G_k^2	G_k^1	G_k^2	G_k^1	G_k^2
1	8,75	4,43	8,75	4,43	0,00	0,00	0,00	0,00
2	8,75	4,80	8,75	4,80	0,00	0,00	0,00	0,00
3	8,75	7,17	8,75	7,15	0,00	0,00	0,00	0,00
4	8,75	7,71	8,75	7,71	0,00	0,00	0,00	0,00
5	8,75	5,20	8,75	5,20	0,00	0,00	0,00	0,00
6	8,75	5,72	8,75	5,74	0,00	0,00	0,00	0,00
7	8,75	4,27	8,75	4,27	0,00	0,00	0,00	0,00
8	8,75	4,52	8,75	4,51	0,00	0,00	0,00	0,00
9	8,75	7,98	8,75	7,96	0,15	0,15	0,20	0,19
10	8,75	7,97	8,75	7,97	0,23	0,22	0,29	0,28
11	8,75	7,56	8,75	7,58	0,01	0,01	0,00	0,00
12	8,75	4,57	8,75	4,58	0,00	0,00	0,00	0,00
13	8,75	4,58	8,75	4,57	0,00	0,00	0,00	0,00
14	8,75	6,79	8,75	6,77	0,00	0,00	0,00	0,00
15	8,75	6,99	8,75	6,99	0,00	0,00	0,00	0,00
16	8,75	8,10	8,75	8,07	1,18	1,16	0,49	0,49
17	8,75	7,94	8,75	7,95	0,26	0,26	0,32	0,32
18	8,75	8,09	8,75	8,06	1,15	1,13	0,75	0,74
19	8,75	7,02	8,75	7,04	0,00	0,00	0,00	0,00
20	8,75	7,22	8,75	7,23	0,00	0,00	0,00	0,00
21	8,75	7,45	8,75	7,44	0,00	0,00	0,00	0,00
Total línea	183,75	136,08	183,75	136,02	2,98	2,92	2,05	2,03

Tabla 3. Compensación económica diaria del sobreesfuerzo de los operarios exigida según los modelos $M3 \cup 4_{\dot{\alpha}I}$, $M4 \cup 3_{\dot{\alpha}I}$, $M1_{\Gamma}$ y $M2_{\Gamma}$.

En cambio, los nuevos modelos, $M1_{\Gamma}$ y $M2_{\Gamma}$, sólo generan sobreesfuerzo en seis y cinco estaciones respectivamente, no estando ninguna de ellas por encima de un factor de actividad igual a 1,005. Consecuentemente los costes por compensación de los nuevos modelos se reducen considerablemente.

Finalmente, en base a los costes activos obtenidos, tanto los costes por pérdida de producción, como los costes por compensación del sobreesfuerzo de los trabajadores, podemos determinar el ahorro que se obtiene con los modelos que consideran la activación de los procesadores frente a los modelos que consideran únicamente una actividad normal a lo largo de toda la jornada laboral (Tabla 4). Los costes totales asociados a cada uno de los modelos se grafican en la Figura 4.

El cómputo global de los costes activos, generados en la línea, dada una secuencia de producción, nos muestra cómo los modelos propuestos en este trabajo son los que proporcionan mejores resultados. En efecto, los costes por pérdida de producción (o sobrecarga de trabajo), superiores a los modelos de referencia, son contrarrestados por la baja compensación económica del sobreesfuerzo exigido a los trabajadores; el hecho de dejar libre la activación de los operarios, dentro de unos límites establecidos, favorece la disminución del tiempo inerte de la línea, así como la disminución del sobreesfuerzo de los procesadores, lo cual se ve traducido en la disminución de los costes y, por tanto, en el aumento del ahorro respecto a los modelos que no consideran activación.

	$M3\cup4$ vs $M3\cup4_aI$	$M4\cup3$ vs $M4\cup3_aI$	$M3\cup4$ vs $M1_F$	$M4\cup3$ vs $M2_F$	$M3\cup4_aI$ vs $M1_F$	$M4\cup3_aI$ vs $M2_F$
$\hat{\Gamma} + \sum_{k \in K} G_k^1$	45,08	46,36	87,80	64,14	77,38	32,98
$\hat{\Gamma} + \sum_{k \in K} G_k^2$	53,41	54,50	87,81	64,14	73,38	21,06

Tabla 4. Ahorro (%) generado por la activación de los operarios en los modelos $M3\cup4_aI$, $M4\cup3_aI$, $M1_F$ y $M2_F$ respecto a los costes activos por pérdida de producción generados por las secuencias obtenidas con los modelos $M3\cup4$, $M4\cup3$, incluyendo los costes por compensación.

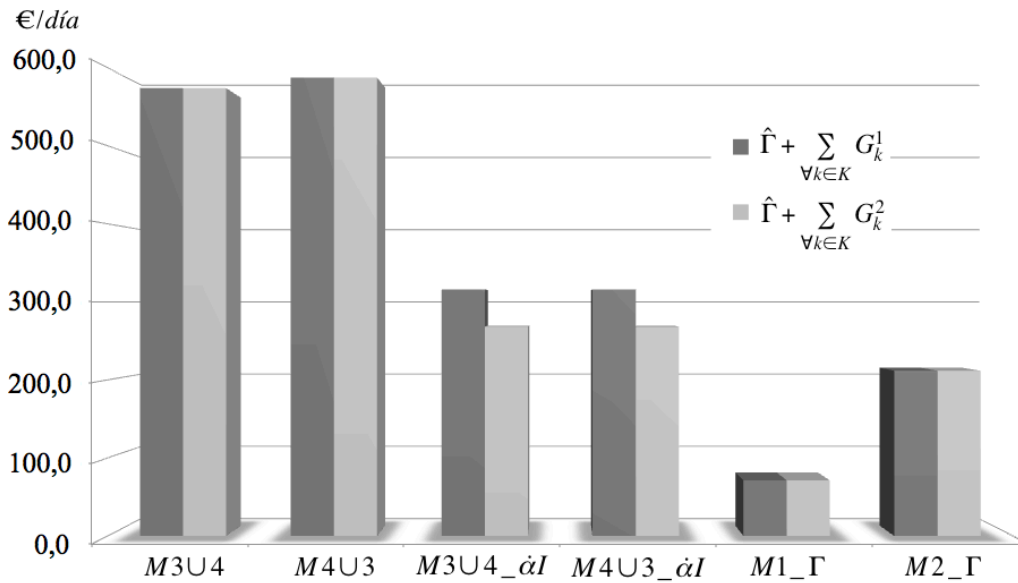


Figura 4. Coste activo total por pérdida de producción, tiempo inerte y por compensación económica del sobreesfuerzo, para los modelos $M3\cup4$, $M4\cup3$, $M3\cup4_aI$, $M4\cup3_aI$, $M1_F$ y $M2_F$.

5 Conclusiones

En este trabajo se han presentado dos nuevos modelos matemáticos para el MMSP-W, el $M1_F$ y $M2_F$, cuyos objetivos son la minimización de costes por pérdida de producción y por tiempo inerte. Estos modelos incorporan la posibilidad de que los procesadores de las estaciones de trabajo puedan aumentar su factor de actividad con el fin de completar mayor cantidad de trabajo requerido en menor tiempo. Obviamente, esta variación del factor de actividad de los procesadores, para reducir la sobrecarga de trabajo, está limitada tanto superior como inferiormente, de acuerdo con los valores máximos y mínimos de rendimiento permitidos por el Convenio Colectivo correspondiente a cada caso de estudio, siendo el utilizado en nuestro caso el XXI Convenio Colectivo de Trabajo de la Empresa Nissan Motor Ibérica, 2012-2014.

Teniendo en mente la compensación económica de los trabajadores por el sobre-esfuerzo realizado, para completar mayor cantidad de trabajo requerido, y con el objetivo de reducir lo máximo posible otro de los inconvenientes de las MMALs, los modelos propuestos también incorporan el concepto de tiempo inerte o desaprovechado. En concreto, se penaliza el tiempo no activo de los procesadores, durante el cual no están trabajando sobre ninguna unidad de

producto. De esta manera, el tiempo inerte se minimizará y, a su vez, favorecerá que la activación de los procesadores sea la mínima necesaria.

Con el objetivo de evaluar el comportamiento de los nuevos modelos, se ha realizado una experiencia computacional basada en un caso de estudio vinculado a la planta de motores de Nissan en Barcelona.

En esta experiencia computacional se han utilizado tanto los nuevos modelos, $M1_\Gamma$ y $M2_\Gamma$, como los modelos de referencia, $M3\cup4_{\dot{\alpha}I}$ y $M4\cup3_{\dot{\alpha}I}$, que incorporan la activación de los procesadores por medio de perfiles prefijados idénticos para todas las estaciones de trabajo, y los modelos originales, el $M3\cup4$ y $M4\cup3$, que no consideran ni la activación de los procesadores ni la penalización del tiempo inerte. Esto nos ha permitido comparar los resultados de los modelos, pudiendo medir el efecto que tiene la incorporación de la actividad variable y del tiempo inerte sobre los costes por pérdida de producción, por tiempo de trabajo desaprovechado y por compensación económica del sobresfuerzo de los procesadores.

Previamente al cálculo de las compensaciones y a la comparación de los costes generados por las secuencias, se ha determinado la sobrecarga y el tiempo inerte inevitables o estáticos, producidos únicamente por la propia composición del plan de demanda e independientes de la secuencia de producción. De esta manera, se ha eliminado de la función de costes, el coste fijo inherente a la productividad de la línea y únicamente se han tenido en cuenta los costes activos generados por la sobrecarga y el tiempo inerte dinámicos y por la compensación del sobresfuerzo de los procesadores.

Los resultados nos muestran que, pese a que los modelos de referencia, $M3\cup4_{\dot{\alpha}I}$ y $M4\cup3_{\dot{\alpha}I}$, dan mejores resultados en cuanto a producción, pues eliminan al 100% la sobrecarga de trabajo, los modelos que mejores resultados económicos proporcionan son los propuestos en este trabajo. Esto es debido a la diferencia entre los niveles de activación de los procesadores de los modelos que, además de generar diferencias en los costes por compensación, también las genera en los costes por penalización del tiempo inerte. En efecto, los modelos propuestos en este trabajo reducen los costes por pérdida de producción de los modelos originales ($M3\cup4$ y $M4\cup3$) y los costes por compensación del sobresfuerzo y por tiempo inerte de sus modelos de referencia ($M3\cup4_{\dot{\alpha}I}$ y $M4\cup3_{\dot{\alpha}I}$), en las siguientes cantidades (ver Tabla 5):

	$M3\cup4$	$M4\cup3$	$M3\cup4_{\dot{\alpha}I}$	$M4\cup3_{\dot{\alpha}I}$	$M1_\Gamma$	$M2_\Gamma$
$\hat{\Gamma}_W$	571,43	585,14	0,00	0,00	64,00	205,71
$\hat{\Gamma}_U$	2,37	2,18	132,12	132,09	4,47	3,92
G^1	0,00	0,00	183,75	183,75	2,98	2,05
G^2	0,00	0,00	136,08	136,02	2,92	2,03

Tabla 5. Costes activos diarios debidos a la sobrecarga de trabajo (\hat{W}), al tiempo inerte dinámico (\hat{U}), a la compensación por sobreactividad por encima de la normal (G^1) y la compensación por tiempo de proceso recuperado (G^2), según los modelos $M3\cup4_{\dot{\alpha}I}$, $M4\cup3_{\dot{\alpha}I}$, $M1_\Gamma$ y $M2_\Gamma$.

Del mismo modo, los resultados nos permiten observar que el criterio de compensación por sobreactividad por encima de la normal beneficia más a los trabajadores en caso de que se les imponga ir a un determinado ritmo de trabajo a lo largo de la jornada laboral. Mientras que el criterio de compensación por tiempo de proceso recuperado beneficia más a la empresa.

En definitiva, los modelos propuestos en este trabajo han permitido reducir los costes productivos de una secuencia de producción, aumentando la productividad de la línea y compensando a los

procesadores en caso de que éstos realicen un sobreesfuerzo; todo ello, respetando las condiciones límite impuestas por los convenios en cuanto a nivel de rendimiento solicitado a los procesadores. En efecto, se ha conseguido un ahorro de más del 60% respecto a los modelos originales ($M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$) y de más del 20% respecto a los modelos de referencia ($M3 \cup 4_{\alpha I}$ y $M4 \cup 3_{\alpha I}$).

Agradecimientos

Esta investigación ha sido subvencionada por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España a través del proyecto FHI-SELM2 (TIN2014-57497-P).

References · Referencias

- Alfaro-Pozo, R., 2015. Modelado y resolución de variantes del problema de secuenciación de modelos mixtos con minimización de la sobrecarga (MMSP-W) con factores de actividad y regularidad en la producción, Industrial Engineering Doctoral Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya BarcelonaTech, Spain, <http://hdl.handle.net/10803/363211>
- Bautista, J., Alfaro-Pozo, R., 2015. Minimización de costes por pérdida de producción y tiempo inerte en el MMSP-WP con activación de los operadores, Technical report OPE-WP.2015/05 (20150429), <http://hdl.handle.net/2117/27690>
- Bautista, J., Alfaro-Pozo, R., Batalla-García, C., 2015a. Consideration of human resources in the Mixed-model Sequencing Problem with Work Overload Minimization: Legal provisions and productivity improvement. *Expert Systems with Applications*, 42(22), 8896-8910, <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2015.07.044>
- Bautista, J., Alfaro-Pozo, R., Batalla-García, C., 2015b. Modeling and solving the mixed-model sequencing problem to improve productivity, *International Journal of Production Economics*, 161, 83-95, ISSN 0925-5273, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.11.018>
- Bautista, J., Cano, A., Alfaro, R., 2012. Models for MMSP-W considering Workstation dependencies: A case study of Nissan's Barcelona plant, *European Journal of Operational Research*, 223(3), 669-679, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2012.07.006>
- Boysen, N., Flidner, M., Scholl, A., 2009. Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique, *European Journal of Operational Research*, 192(2), 349-373. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2007.09.013>
- Macaskill, J.L.C., 1973. Computer simulation for mixed-model production lines. *Management Science* 20(3), 341-348. <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.20.3.341>
- Okamura, K., Yamashina, H., 1979. A heuristic algorithm for the assembly line model-mix sequencing problem to minimize the risk of stopping the conveyor, *International Journal of Production Research*, 17(3), 233-247, <http://dx.doi.org/10.1080/00207547908919611>
- Scholl, A., Klein, R., Domschke, W., 1998. Pattern based vocabulary building for effectively sequencing mixed-model assembly lines, *Journal of Heuristics* 4(4), 359-381, <http://dx.doi.org/10.1023/A:1009613925523>
- Thomopoulos, N.T., 1967. Line Balancing-Sequencing for Mixed-Model Assembly. *Management Science*, 14(2), 59-75, <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.14.2.B59>
- Yano, C.A., Rachamadugu, R., 1991. Sequencing to minimize work overload in assembly lines with product options. *Management Science*, 37(5), 572-586, <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.37.5.572>